

流体压力对沉降场地输液管网应变特性的影响

陈艳华¹, 连 凯², 李剑楠³, 陈海彬¹, 葛 楠¹, 蒋录珍⁴

(1. 华北理工大学 建筑工程学院, 河北 唐山 063210; 2. 中建路桥集团有限公司, 河北 石家庄 050001;
3. 华北理工大学 机械工程学院, 河北 唐山 063210; 4. 河北科技大学 建筑工程学院, 石家庄 050018)

摘要: 管内流体压力和场地变形影响着管网力学性能。设计小型埋地输液管网室内试验模型, 利用 MTS 加载装置模拟场地不均匀沉降, 研究管内流体压力对管网应变特性的影响。通过分析不同流体压力和场地沉降作用下管网的应变、变形等试验结果, 得出: 场地沉降中心或附近的管网应变最大, 易破坏; 在一定的压力范围内, 管网内部流体压力越大, 管网应变越小, 管网抵抗场地破坏能力越强; 分支管道的存在使得三通连接处的管道受力发生变化, 容易产生应力集中现象, 且靠近沉降中心位置的管段变形严重, 而分支处的支管道变形较小, 抵抗破坏能力较强。

关键词: 埋地管网; 不均匀沉降; 流体压力; 应变; 试验模型

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)05-0645-09

Effects of fluid pressure on strain properties of liquid-conveying pipe network in settlement site

CHEN Yanhua¹, LIAN Kai², LI Jiannan³, CHEN Haibin¹, GE Nan¹, JIANG Luzhen⁴

(1. College of Civil and Architecture Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China;

2. CSCEC Road and Bridge Group CO., LTD, Shijiazhuang 050001, China;

3. School of Mechanical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China;

4. School of Civil Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: Fluid pressure within pipes and site deformation influence the mechanical properties of buried pipe network. By designing an experimental model of small buried pipe network in the laboratory and simulating the uneven settlement by loading equipment-MTS, the effects of internal fluid pressure on the strain properties of buried pipe network were investigated. By analyzing the experimental results of strain and deformation of pipes under the effects of fluid pressures and site subsidence, the following conclusions are reached. In general, pipes at or near the center of subsidence region are easily damaged whose strain is the largest. Within a span of pressure, the more the internal pressure within pipe network, the less strain and the greater resistance of pipe network is to site damage. But the existence of branch pipe makes the stress concentration of the pipe at the T-junction, and serious deformation near the center of subsidence region, which is easily destroyed. As the deformation of branch pipe at the T-junction is less, its capacity for resisting damage is stronger.

Key words: buried pipe network; uneven subsidence; fluid pressure; strain; experimental mode

埋地管网以其节省地面空间, 美化城市等优点广泛应用在油气运输、市政工程等行业, 其安全可靠的运行是保证国民经济发展和社会安定的主要因素。场地条件对埋地管道的影响不同, 如场地断层、场地液化、场地沉降等, 加上管内流体压力的作用, 其对埋地管网力学性能的影响值得深入研究。

众所周知, 试验是重要的研究手段, 在埋地管道的试验研究中, 有些是涉及管道泄漏行为或

过程的^[1-3], 有些是涉及管道破坏机理的, 而力学破坏机理是本研究关注的重点。2000 年, 我国学者冯启民等^[4]采用中间有裂缝的箱体, 将一侧箱体置于振动台上, 加载正弦波来模拟地震断层, 分析管道的力学性能。2005 年, O'Rourke 等^[5]通过模拟场地永久变形, 分析了此场地条件对管道的力学影响, 开创了一个新的试验模型。2007 年, Khatri D. K. 等^[6]在此试验模型的基础上进行改进, 研究了埋地管道在正常使用情况下的力学响

应. Choo 等^[7]进行了大量试验,对 O'Rourke 的试验进行了补充. 2014 年曹建国^[8]对承插式柔性接头的管道进行了拉拔和弯曲破坏试验,分析了此类管道的力学性能和抗震性能. 2015 年李立云^[9]等建立由五个刚性箱体组成的试验模型,两边及中间放置在振动台上,其余两个悬挂固定,依次加载 El Centro 波、Kobe 波和北京人工波,分析横向水平地震作用下埋地管线对场地的影响. 王闯等^[10]在室外宽阔空地上铺设范围为 24 m×24 m,“田”字型,埋深为 0.5 m 的管网,通过 TNT 爆炸来模拟地震作用,分析管道接头的抗震性能. 2016 年周敏等^[11]通过自制大型模拟试验系统,研究埋地 HDPE 双壁波纹管的受力性能和回填土体沉降的分布规律.

综上所述,直管道或带接头的直管道作为管网系统的主要组成,其在地震作用下的力学性能试验已取得一些研究成果,但这些成果中考虑管内流体作用的较少,且即使考虑流体作用也仅是考虑静止封闭于一段管道内的流体. 然而实际的管网系统,流体在其内部做着开口或闭口方式的运行,且管网连接方式也会因场地、道路、用户等不同而发生变化,即管网不是单一的直管段,所以管网抗震性能的研究难度较大. 本文以设计小型埋地枝状输液管网为对象,通过分析流体压力和沉降场地共同作用下的管网应变特性,为揭示埋地管网力学破坏机理和抗震设计提供参考.

1 试验方案

1.1 试验目的

本试验以研究管内流体压力与场地沉降共同作用下,不同管网的应变与变形情况为目的,力求完善管网破坏的力学机理.

1.2 试验装置与试件材料

参照文献[12]模型相似设计简化方法及结论,确定室内试验装置尺寸,即当管道平面尺寸与地基平面尺寸之比小于 1/5 时,模型边界效应对管道的动力反应影响已经很小,则管体之间距离必须大于试件最大管径的 5 倍. 因此,本试验中选用的最大管径不超过 60 mm,管体两侧土体的范围应不小于 300 mm. 于是改进项目组已有试验装置^[13]设计管网试验模型的主体. 如图 1,试验主体装置由三个用于埋设管道的无盖箱体组成,尺寸及固定方式如表 1 所示. 箱体 1 在 MTS 动力装置下可以相对于固定箱体做上下运动. 在此基础上,设

计小型埋地输液管网,如图 2 所示. 由图 2 可以看出,管道分为上下两层布置,上层主要用于模拟直管道形成的循环管网,下层主要模拟带有分支的埋地管网,即下层的两根管道中一根作为主管道,另外一根作为支管道,本研究中分支位于箱体 1、2 交界处(即固定区与沉降区的交界,且支管道通过沉降区). 另外,上下两层管道在箱体外面连接,并通过水泵和水箱,形成一典型的小型循环供水管网,如图 3 示.

试验用管道材料为无缝钢管,外径为 40 mm,壁厚 4 mm,上层管道埋深 0.4 m,下层管道埋深 0.6 m. 按照试验标准,在管道外壁粘贴应变片,并对试验用钢管的母材进行力学性能的试验,根据试验结果得知,本次试验所用管道屈服应变为 $\epsilon = 1\,858.5 \times 10^{-6}$,具体数据如表 2 所示.

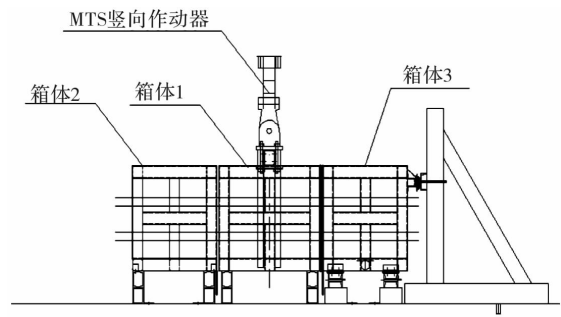


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test equipments

表 1 箱体尺寸及固定方式

Tab. 1 Size and fixation mode of test boxes

箱体编号	长×宽×高 (m×m×m)	固定方式
1	1.4×0.9×0.8	不固定,可上下运动
2	1.2×0.9×0.8	固定在地面上
3	1.2×0.9×0.8	固定在地面上

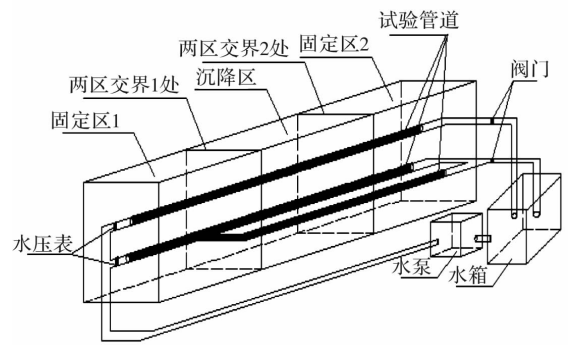


图 2 小型埋地管网连接示意图

Fig. 2 Schematic diagram of connection of small buried pipe network



图 3 不均匀沉降下小型埋地管网试验图片

Fig. 3 Test picture of small buried pipe network under uneven subsidence

1.3 仪器的测量

(1)测量管道的应变

采用应变片, 导线, 动态应变仪等测量管道的应变. 本试验分别在沉陷区中心、两区交界处及距交界处 600 mm、350 mm 处的管道上粘贴应

变片, 具体观测点及贴片位置如图 4.

表 2 管道基本参数				
Tab. 2 The basic parameters of pipe				
管道类别	管径 /mm	壁厚 /mm	埋深 /m	屈服应变 ($\times 10^{-6}$)
上层管道	40	4	0.4	1 858.5
下层主管道	40	4	0.6	1 858.5
下层支管道	40	4	0.6	1 858.5

(2)测量箱体位移

选用 LVDT 测量仪(量程为 $-75\sim 75$ mm), 将其一端固定在门架上, 另一端紧贴着中间箱体, 测量箱体的竖向位移.

(3)测量管道位移

箱体 1 和 3 的交界处设置管道位移观测点, 钢绞线一头连接管道, 另一头与拉绳线位移传感器相连接.

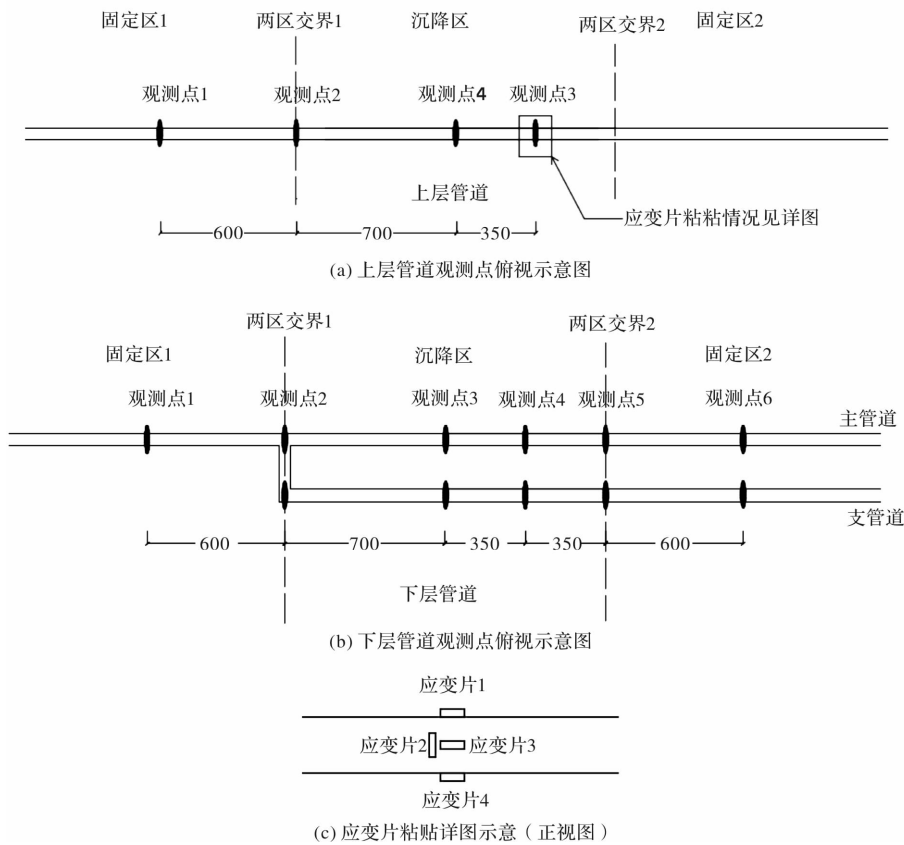


图 4 观测点及应变片位置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of observation points and the strain patches

(4)数据采集

采用 7 台 8 通道的动态信号采集器, 完成试验数据的采集.

1.4 模型加载

本试验通过 MTS 拟动力设备对土箱施加位移

荷载, 模拟场地不均匀沉降, 加载速率为 220 mm/1 500 s.

1.5 试验过程

管网埋设完成且土体经过人工夯实后, 连接数据测量装置并进行初值检测和校准. 然后, 打

开水泵开关,调节管网阀门,保持管网一定水压,待循环水系统稳定后,通过MTS装置进行中间箱体的加载,记录试验过程及数据。

2 试验结果与讨论

本试验管网内部流体压力分别为 0.25 MPa、0.15 MPa、0.05 MPa,土体容重 1.47 g/cm^3 。整理试验数据,对管网中的关键点应变进行分析。

2.1 管网应变分析

对不同内压试验数据处理,发现管道应变变化趋势大致相同,于是以内压 0.15 MPa 为例进行分析。

(1) 沉降区中心处管网的应变

由图 4 可知,上层管道在沉降区中心对应观测点 4,下层两管道对应观测点 3,于是绘制各管道在该处各应变片的值随箱体位移(场地沉降位移)的变化曲线,如图 5 所示。

由图 5 看出,无论是上层管道还是下层的主管道和支管道,粘贴于管道上下表面的应变片 1 和 4 的应变数值变化明显大于侧面应变片 2,3 的变化,这说明管道上下表面的受力大于侧面。

图 5(a)和图 5(b)中 1、4 应变片结果的变化说明,在管道达到屈服应变前,管道底部拉应变略大于管道顶部压应变,所以管道底部更加容易发生拉破坏。应变片 2 测量的管道环向应变,在沉降初期很小,当沉降量大于 50 mm 后,环向应变增大,且增长速率逐渐加快直至破坏。应变片 3 测量管道侧面轴向应变,此位置应变数值始终较小且波动范围小,说明管道侧面不易发生轴向拉压破坏。

图 5(c)中各应变片数值变化与图 5(a)、图 5(b)有所不同。因为是下层支管道,存在 90° 弯头,当沉降量较小时,该弯头与支管道受力较一致,管道上表面受压,下表面受拉,但沉降量较大时,弯头约束了支管道受力,造成管道上表面的压应变逐渐减小,进而承受越来越大的拉应变,此时管道下表面应变与上表面正好相反。应变片 2 的数值也受弯头影响,波动较大,但总的变化范围较小。

由上可见,场地沉降对管道上下表面的轴向应变影响很大,对侧面轴向和环向应变影响可以忽略,所以下面就以各观测点处应变片 1 的数据为主要数据来源进行整理与分析。

(2) 管网各观测点上表面的应变

整理图 4 所示管网各观测点应变片 1 处的数据,绘制各观测点上表面应变随箱体位移的变化曲线,如图 6 所示。

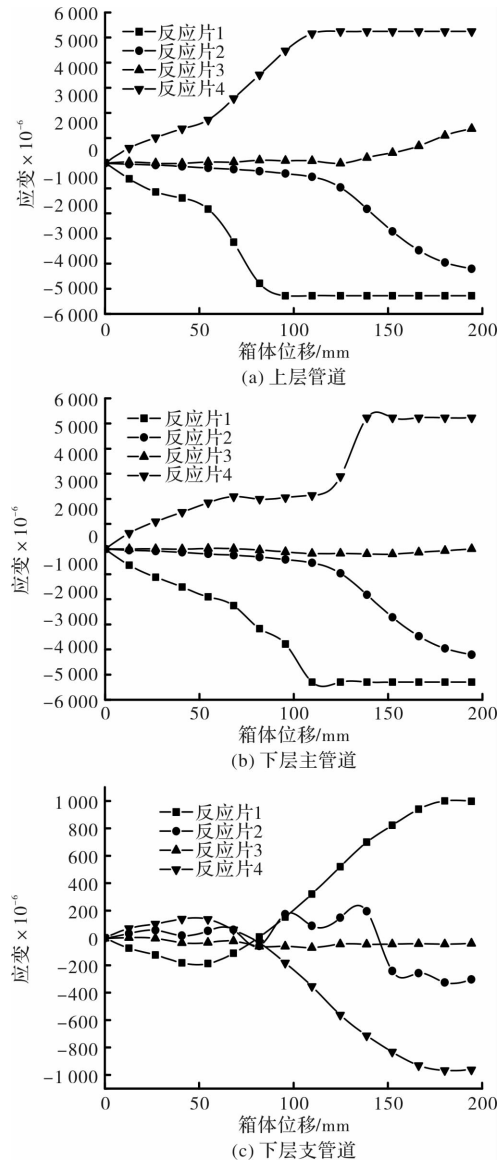


图 5 沉降区中心管道应变随箱体位移的变化曲线

Fig. 5 Curves of pipe strain vs. displacement of test box in the center of subsidence region

由图 6 看出,管网各观测点上表面应变因所处位置不同,应变大小与方向各不相同。

如图 6(a),上层管道观测点 1 位于固定区 1,由于中间箱体下沉,其内管道上表面受压,但两侧固定区对下沉管道产生反向作用,使观测点 1 的管道上表面受拉,形成反向弯曲,且拉应变随着沉降位移的增大而增大。观测点 2 位于两区交界 1 处,管道上表面表现为明显的拉应变,即交界处抵御管道下沉的反向作用,并随箱体沉降位移的增大而增大。观测点 4 位于沉降区中心,其上表面受压,且数值远大于其他观测点应变。观测点 3 距离两区交界 2 处 350 mm,此处管道上表面依然受压,但压应变数值远小于沉降区中心。

图 6(b)下层主管道各观测点上表面的应变变化与图 6(a)基本一致。沉降区中心观测点 3 应变

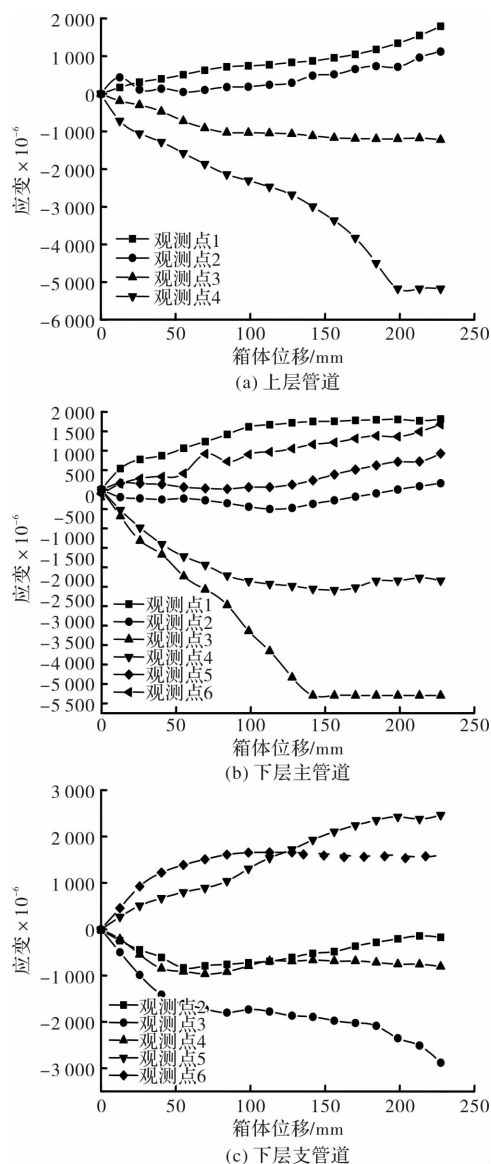


图6 各观测点上表面应变随箱体位移的变化曲线

Fig. 6 Curves of strain of upper surface vs. displacement of test box to observation points

最大。观测点1、6位于两个固定区,但观测点1距离分支位置较近,受分支连接方式影响较大,所以应变较大。观测点2、5皆为两区交界处,测点2处上表面受压,与上层管道同位置测点2的受拉不同,这是因为下层管道在两区交界1处的管道分支连接影响了原来在该位置处的反向作用。测点5管道受分支连接的影响较小,所以保持受拉状态。

对于下层支管道,由图6(c)可以看出,沉降区中心观测点3管道上表面应变依然最大,属薄弱位置。因三通连接使支管道在土体沉降过程中,除与土体一起沉降,还会发生一定量的转动,所以造成两区交界处1(观测点2)支管道应变相对较小。管道分支位置,改变了支管道整体受力性能,使管道反弯点向沉降区中心靠近,因此在沉降区

1/4处应变也相对较小。

2.2 流体压力对管道应变的影响

由2.1分析得出,管网沉降区中心位置处上下表面应变很大,为管网循环系统中的薄弱环节,因此针对此位置,对比该处管道上表面应变,分析流体压力的影响。

(1) 沉降区中心管道应变

当管内流体压力分为0.05 MPa, 0.15 MPa和0.25 MPa时,上下层各管道应变随沉降位移的变化如图7所示。

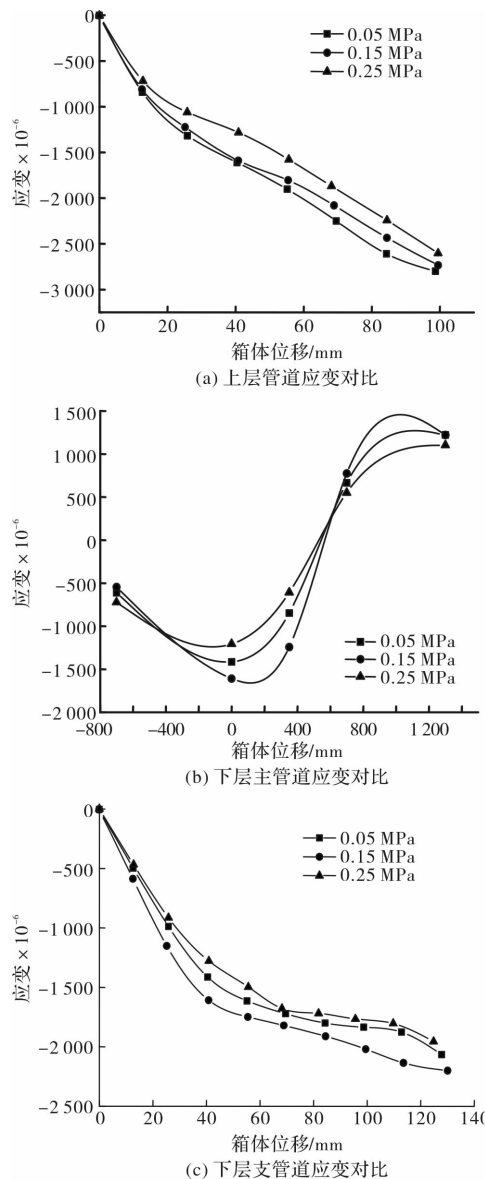


图7 不同流体压力下沉降区中心管道上表面应变随箱体位移的变化曲线

Fig. 7 Curves of strain of upper surface of pipe at the center of subsidence region vs. displacement of test box under different fluid pressure

由图7可以看出,沉降区中心的管道上表面压应变随箱体沉降位移的增大而增大,沉降前期,管道在弹性范围内应变增长迅速,因为此时管道

随土体一同沉降, 相对位移小, 管道自身恢复力相对较小, 应变增长速度较快; 随着沉降量的增大管道恢复力也随之增大, 应变增大趋势相对较小, 而且管道内外压差越小, 管道抵抗变形能力越强, 管网系统越稳定; 后期达到屈服之后, 进入塑性阶段, 应变增长减慢。另外, 当箱体沉降位移相同时, 管道应变随流体压力的增大而减小。根据试验管道的屈服应变值, 可由图 7 进一步得出, 场地沉降区中心的管道, 在一定压力范围内, 管网内部流体压力越大, 管道屈服时土体沉降量越大, 管网系统越稳定。因为土体沉降过程中, 埋置在土体中的管网上表面承受土体作用力, 其内部流体压力能与之抵消一部分, 使得管网所承受的总压力减小, 进而内压越大, 管道所受的总压越小, 管网稳定性越高, 抵御场地沉降引起的管道破坏能力越强。当然如果管网的内压超过土体作用于管道的压力, 那么将会出现相反的情况, 特别是高压管网, 其不在本文的研究范围。

(2) 沿管长的应变分布

分别选取箱体沉降量为 13 mm 和 40 mm 时的管道上表面应变, 绘制不同管内流体压力下, 沿管网中各管长方向的应变曲线, 如图 8—图 10 所示。图中横坐标原点为沉降区中心位置, 标为“0”, 固定区 1 位于横坐标 -700 mm 左侧, 固定区 2 位于横坐标 700 mm 右侧。横坐标 -700 mm 和 700 mm 为两区交界处 1, 2。

图 8 为上层管道沿管长的应变分布。根据文献[14]可知, 单根管道穿越沉降区时, 管道应变沿沉降中心呈轴对称分布。所以对图 4(a) 中未标注观测点应变数据可通过轴对称分布的已标注观测点应变数据得到。

由图 8 可以看出, 上层管道的应变沿管长方向, 以沉降中心为轴对称分布。此图 8(a) 和 8(b) 中对应位置的点在土体沉降量较大时(40 mm), 应变也较大。管网流体压力为 0.05 MPa 时, 对应沉降区相同位置的管道应变明显大于内压为 0.15 MPa 和 0.25 MPa 的。沉降区管道应变普遍大于固定区, 且沉降中心应变最大, 固定区存在反弯点。两区交界附近应变最小。

另外, 由图看出, 管网固定区远端同一位置管道应变随管网内部压力的增大而增大, 这是因为, 通常情况固定区管道与周围土体处于一种平衡状态, 当有场地沉降发生时, 会对固定区场地及管道产生一定的影响, 而此时管内流体压力的变化更是破坏了这种平衡, 使得流体压力增大时,

对应的管道应变也增大。

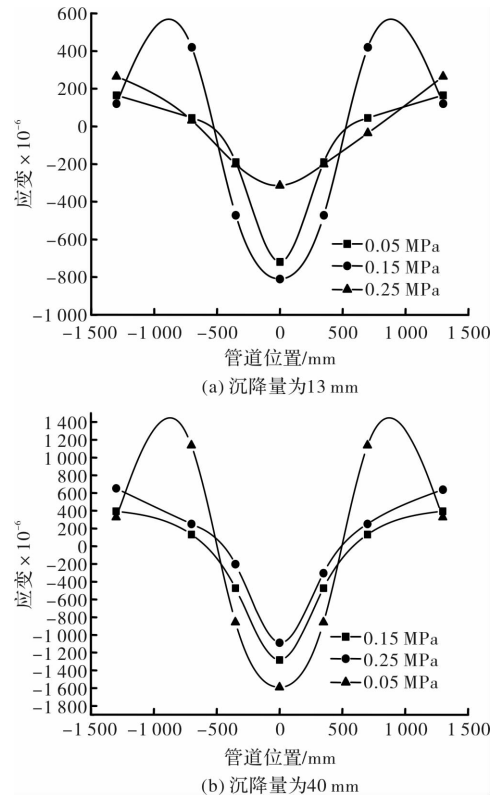


图 8 不同流体压力和沉降量下上层管道沿管长的应变分布

Fig. 8 Strain of the upper pipe along pipe length under different fluid pressure and subsidence

综上所述: 类似上层直管道构成的管网, 在流体压力和场地沉降共同作用下, 沿管长的应变以沉降区中心轴为轴对称分布。相同沉降量下, 上层管网内部压力越小, 沉降区管道应变越大, 固定区管道应变越小, 反弯点应变越大。

图 9 为下层主管道沿管长的应变分布。可以看出, 与上层管道不同, 下层主管道沿管长的应变分布没有呈轴对称, 这是因为下层管网在 -700 mm 处存在树状分支, 改变了管道受力状况, 管道通过三通连接, 抗弯能力小于管道本身。管道最大应变出现在接近沉降区中心的右侧位置, 随着管道内部压力增大, 应变最大处向沉降区中心靠近。固定区 1 应变最大值出现在观测点 1 左侧, 固定区 2 应变最大值出现在距交界处约 250~350 mm 处。土体沉降量较大, 对应管网的应变也较大。图 9(a) 下层主管道在沉降量为 13 mm 时, 管道还处于弹性工作范围; 而沉降量达到 40 mm 时, 如图 9(b), 管网内部压力为 0.05 MPa 管道在沉降区中心位置达到屈服应变, 且管道内部压力越大, 应变值越小, 由此更加说明, 在一定的压力范围内, 管网稳定性随管内流体压力的增大而增大。

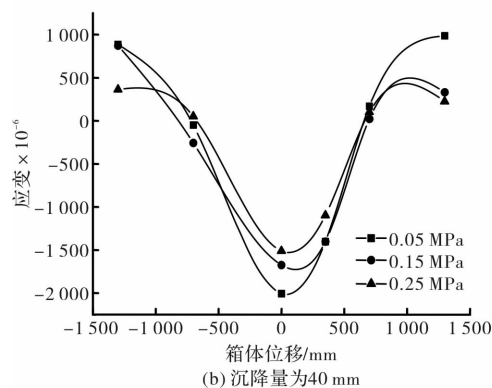
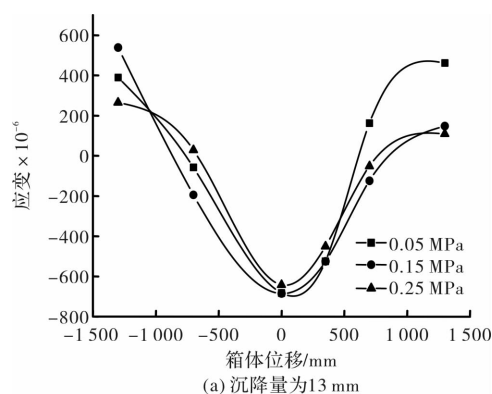


图9 不同流体压力和沉降量下下层主管道沿管长的应变分布

Fig. 9 Strain of main pipe at the bottom along pipe length under different fluid pressure and subsidence

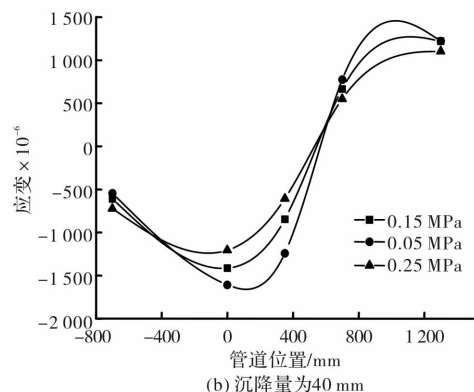
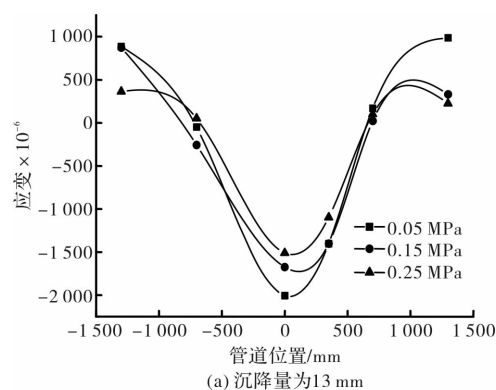


图10 不同流体压力和沉降量时下层支管道沿管长的应变分布

Fig. 10 Strain of branch pipe at the bottom along pipe length under different fluid pressure and subsidence

图10给出了下层支管道沿管长的应变分布。可以看出,下层支管道的整体应变大于上层和下层主管道。在观测点2(两区交界1)处应变较小,管道应变出现2个最大点,应变最大位置为沉降区距交界2处约500~700 mm处和固定区2距交界2处约100~200 mm处。本试验管道采用螺纹三通连接,在土体发生沉降时,支管道跟随土体运动更加紧密,在观测点2处三通具有一定的转动,支管道受力与断层类似,但又有一定的差别,因此,交界1处应变较小。观测点6应变数值大致相同,说明远离沉降区的固定区内管道的应变较小,且逐渐趋于相同值。另外,管道内部压力越大,管道应变变化越小。

2.3 管道变形分析

(1) 上层管道

图11给出试验后上层管道的实际变形图。可以看出管道在沉降区中心处变形最大,在两端固定区管道各存在一反弯点,与前面的应变分析结果相一致。

(2) 下层管道

试验前后箱体下层管道的变形对比如图12所示。

从图12(a)看出,试验前,下层管道平直,支管道与主管道在同一水平面。而由图12(b)可以看出,箱体下层管道在随土体沉降过程中,支管道沉降量大于主管道,且因螺纹三通连接,支管道发生了一定的转动,改变了支管道受力,使支管道变形不同于主管道。另外,交界处位置支管道应变较小,较为安全。最终下层管道离开箱体的变形情况如图13所示。



图11 上层管道实际变形

Fig. 11 The actual deformation of upper pipes

由图13可以看出,下层主管道与支管道变形趋势不完全相同,主管道存在两个反弯点,而支管道却在沉降中心右侧变形最大。另外,主管道在沉降中心变形较大,应变也较大,支管道在交界1处发生旋转随土体运动,应变较小,在交界2处变形较大,应变也较大,与测量的应变数据相一致。



图12 箱体下层管道试验前后变形

Fig. 12 The deformation of the bottom pipe before and after the test in the box



图13 下层管道实际变形

Fig. 13 The actual deformation of the lower pipe

3 结论

通过设计管网土箱试验模型,借助箱体位移模拟场地不均匀沉降,研究管网流体压力对埋地管网应变特性的影响,分析不带分支管的管网管段、带分支管的管网主管道和支管道,得出以下结论:

(1)在一定的流体压力和场地沉降作用下,管网各管段上下表面的轴向应变远大于管段侧面环向和轴向应变,即侧面应变可忽略。且上层直管道和下层主管道上表面产生的压应变小于下表面产生的拉应变。

(2)场地沉降作用下,管网流体压力影响管网整体稳定性。管网在达到屈服应变以前,一定的压力范围内,流体压力越大,管网整体应变越小,稳定性越好。相同沉降量时,下层支管道的整体应变大于上层和下层主管道。由直管道构成的管网,沿管长方向的应变以沉降区中心呈轴对称分布,即沉降区中心是不带分支管网的薄弱位置。而带有分支的管网,应变分布不再对称,所以距离沉降中心的某一位置才是管网的薄弱环节。

(3)通过螺纹三通连接的分支位置改变了管网主管道和支管道的受力情况;主管道最大应变发生在沉降区中心附近;支管道在分支位置随土体一起沉降,减缓了土体对管道的作用力,分支处支管道应变较小,支管道其他位置受力与主管道不同,且最大应变发生在沉降区距交界2处500~

700 mm处。

参考文献 References

- [1] JASPER A A, OVE G T, TORLEIV B. Experimental study of oil pipeline leak processes[J]. Journal of Environmental Protection, 2012, 3: 597-604.
- [2] PAOLA F D, GALDIERO E, GIUGNI M, et al. Experimental investigation on a buried leaking pipe[J]. Procedia Engineering, 2014, 89: 298-303.
- [3] 谢昱妹,汪彤,吕良海,等. 城市管道天然气在土壤中扩散行为全尺度实验[J]. 天然气工业, 2015, 35(8): 106-113.
XIE Yushu, WANG Tong, LÜ Lianghai, et al. Full-scale experiment of diffusion behaviors of city pipeline gas in soils[J]. Natural Gas Ind., 2015, 35(8): 106-113.
- [4] 冯启民,郭恩栋,宋银美,等. 跨断层埋地管道抗震试验[J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(1): 56-62.
FENG Qimin, GUO Endong, SONG Yinmei, et al. Aseismic test of buried pipe crossing fault[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, 20(1): 56-62.
- [5] O'ROURKE M, GADICHERLA V, ABDOUN T. Centrifuge modeling of PGD response of buried pipe[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 22(2): 81-85.
- [6] KHATRI D K. Experimental evaluation of the behavior of steel-reinforced high density polyethylene (SRHDPE) pipes[D]. Kathmandu: Nepal Tribhuvan University, 2007.
- [7] CHOO Y W, ABDOUN T H, O'ROURKE M J, et al. Remediation for buried pipeline systems under permanent ground deformation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27: 1043-1055.
- [8] 曹建国. 场地大变形下供水管道破坏试验及地震安全评估[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
CAO Jianguo. Test and seismic assessment of water supply pipeline under large ground deformation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [9] 李立云,王成波,韩俊艳,等. 埋地管道-场地地震反应振动台试验研究的场地响应[J]. 地震工程与工程震动, 2015, 35(3): 166-176.
LI Liyun, WANG Chengbo, HAN Junyan, et al. Analysis of site responses during shaking table test for the interaction between pipeline and soil[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2015, 35(3): 166-176.
- [10] 王闯,刘威,李杰. 爆炸模拟地震作用埋地供水管网原型试验[J]. 同济大学学报, 2015, 43(10):

- 1487-1496.
- WANG Chuang, LIU Wei, LI Jie. Full-scale test of buried water supply pipeline network with explosion simulation earthquake[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(10): 1487-1496.
- [11] 周敏,杜延军,王非,等. 地层沉陷中埋地 HDPE 管道力学状态及模型试验分析[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(2): 254-262.
- ZHOU Ming, DU Yanjun, WANG Fei, et al. Physical modeling of mechanical responses of HDPE pipes and subsurface settlement caused by land subsidence [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(2): 254-262.
- [12] 张志超,王进廷,徐艳杰. 跨断层地下管线振动台模型试验研究(I)——试验方案设计[J]. 土木工程学报, 2011, 44(11): 93-98.
- ZHANG Zhichao, WANG Jinting, XU Yanjie. Shaking table test for cross-fault buried pipelines (I)—
- model design [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(11): 93-98.
- [13] 陈艳华,刘晓,王乐,等. 穿越走滑断层埋地管道应变特性的试验研究[J]. 北京交通大学学报, 2017, 41(4): 55-61.
- CHEN Yanhua, LIU Xiao, WANG Le, et al. Experimental research on strain properties of buried pipelines at strike-slip fault crossing[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2017, 41(4): 55-61.
- [14] 王乐. 不均匀沉降下埋地输液管道力学性能的试验研究[D]. 唐山:华北理工大学, 2016.
- WANG Le. Experimental research on mechanical properties of buried pipeline for liquid-conveying under differential settlement[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2016.

(编辑 沈 波)

(上接第 637 页)

- [7] 张明朗, 蔺鹏臻. 浅谈建筑结构分析中计算简图的建立[J]. 力学与实践, 2011, 32(2): 86-89.
- ZHANG Mingliang, LIN Pengzhen. Discussion on tablishment of calculation sketch in building structure analysis [J]. Mechanics in Engineering, 2011, (2): 86-89.
- [8] 周继, 严定国, 田芳. 城际铁路小半径现浇简支弯梁设计与研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 2(1): 106-110.
- ZHOU Ji, YAN Dingguo, TIAN Fang. Design and research of simply cast in place curved beam with small radius for intercity railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 2(1): 106-110.
- [9] 寇延春. 客运专线大跨度曲线连续梁变形研究[J]. 铁道工程学报, 2015, 4(4): 71-75.
- KOU Yanchun. Study on deformation of long span continuous curved beam of passenger dedicated line [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 4(4): 71-75.
- [10] 徐艳秋, 许克宾, 王丽. 薄壁弯梁桥空间有限元分析[J]. 土木工程学报, 2003, 36(2): 58-62.
- XU Yanqiu, XU Kebin, WANG Li. Spatial finite element analysis of thin walled curved beam bridge[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(2): 58-62.
- [11] 徐帮树, 杨为民, 王者超, 等. 公路隧道型钢喷射混凝土初期支护安全评价研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 248-254.
- XU Bangshu, YANG Weiming, WANG Zhechao, et al. Study on safety evaluation of initial support of steel reinforced shotcrete for highway tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(1): 248-254.
- [12] 张德华, 刘士海, 任少强. 三台阶七步法施工高地应力隧道支护结构受力特性分析[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(1): 96-102.
- ZHANG Dehua, LIU Shihai, REN Shaoqiang. Analysis of the force applied on the support structure in a high-geostress tunnel constructed by the three-bench seven-step method[J]. Modern Tunneling Technology, 2016, 53(1): 96-102.
- [13] 高峰, 谭绪凯. 双侧壁导坑法施工的大断面隧道的稳定性分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2010, 29(3): 363-340.
- GAO Feng, TAN Xukai. Stability analysis on large section tunnel with double-side-drift method[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2010, 29(3): 363-340.
- [14] 郭彦林, 马智刚, 陈国栋, 等. 闭口式压型钢板—混凝土组合楼板受弯承载力的试验研究[J]. 建筑结构, 2005, 35(1): 38-41.
- GUO Yanlin, MA Zhigang, CHEN Guodong, et al. Experimental study on loading capacity of composite floor of closed profiled steel sheet and concret [J]. Journal of Building Structures, 2005, 35(1): 38-41.

(编辑 沈 波)